Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 1, March-April 2021, p. 107-119

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۱۱۹-۱۰۷

مقاله پژوهشی

تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک‌های با بافت متوسط و سبک در استان خراسان رضوی

مهدی زنگی آبادی[1*]- منوچهر گرجی[2]- پیمان کشاورز[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷

چکیده

انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک و تجمیع آنها در قالب یک شاخص، می‌تواند به اخذ تصمیمات صحیح مدیریتی منابع و اراضی کمک شایانی نماید. این پژوهش با هدف تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک در پنج کلاس بافتی لوم، لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی و لوم رسی سیلتی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی طرق در استان خراسان‌رضوی انجام شد. پس از نمونه‌برداری‌های لازم از خاک ۳۰ نقطه و انجام اندازه‌گیری‌های صحرایی و آزمایشگاهی، تعداد ۳۵ ویژگی فیزیکی خاک تعیین و با استفاده از روش آماری تجزیه مؤلفه‌های اصلی، مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک تعیین گردید. سپس با وزن‌دهی و استفاده از دو روش امتیازدهی خطی به ویژگی‌های منتخب، شاخص کیفیت فیزیکی خاک در قالب یک مقدار عددی محاسبه شد. نتایج نشان داد که تنها شش ویژگی فیزیکی خاک شامل میانگین قطر منافذ، آب قابل استفاده (ظرفیت مزرعه در مکش ۱۰۰ سانتی‌متر)، تخلخل کل، انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (ظرفیت مزرعه در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر)، شاخص پایداری خاک‌دانه و آب قابل استفاده (ظرفیت مزرعه در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر) می‌توانند حدود ۹۰ درصد تفاوت خاک‌های مورد مطالعه را توجیه نمایند. مقایسه روش‌های مختلف محاسبه شاخص عددی کیفیت فیزیکی خاک نشان داد که بیش‌ترین مقدار ضریب حساسیت مربوط به روش انتخاب متغیرها با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی و وزن‌دهی آنها و استفاده از روش امتیازدهی در محدوده بین صفر و یک بوده و شاخص محاسبه شده با این روش به عنوان مناسب‌ترین معیار جهت طبقه‌بندی خاک‌های مطالعه شده در قالب چهار کلاس کیفیت خاک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت خاک، کوچک‌ترین مجموعه داده، مؤلفه اصلی

مقدمه

در راستای بررسی کیفیت خاک باید ابتدا شاخص‌های کلیدی و مقادیر بحرانی آنها تعیین گردد. شاخص‌های کیفیت خاک را می‌توان به صورت فرآیندها و خصوصیاتی از خاک که به تغییرات در توان تولید محصول حساس هستند تعریف نمود. بارداواج و همکاران (۴) معتقدند که شاخص‌های کیفیت خاک باید با قابلیت‌های متفاوت خاک مانند محیط رشد برای گیاهان، نگهدارنده و انتقال دهنده مواد و همچنین محیطی برای زندگی موجودات زنده خاکی، مرتبط باشد. با توجه به تغییرات مکانی خاک، کمی‌سازی تغییرات کیفیت خاک کار بسیار دشواری است به جز در شرایطی که تغییرات در خصوصیات یک خاک خاص بررسی شود (۴). هرچند می‌توان تنها از یک شاخص برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده نمود ولی استفاده از شاخص‌های چند متغیره می‌تواند مفیدتر و کاربردی‌تر باشد. ایماز و همکاران (۹) معتقدند که در بحث ارزیابی کیفیت خاک باید کلیه خصوصیات ذاتی و همچنین پویای خاک لحاظ گردد و کلیه برهم‌کنش‌ها و فرآیندهای خاکی مدنظر قرار گیرند. برای یک خاک در محدوده مشخص این ارزیابی تحت تأثیر عوامل مدیریتی مختلف از جمله خاک‌ورزی، تناوب زراعی، کاربرد کودهای حیوانی و سبز و عوامل دیگری مانند اقلیم و نوع خاک قرار می‌گیرد. برای تعیین شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک در ارتباط با رشد گیاه نیاز به انجام تعداد زیادی آزمایشات مختلف جهت تعیین دقیق ارتباط خاک و گیاه می‌باشد. استفاده از کوچک‌ترین مجموعه داده‌ها[4] این اندازه گیری‌ها را کاهش داده و با تعداد کمتری از عوامل یا شاخص‌ها می‌توان کیفیت فیزیکی خاک را ارزیابی نمود. جهت ارزیابی کوچک‌ترین مجموعه داده‌ها و خصوصیات قابل اندازه

۱ و ۳- به‌ترتیب استادیار و دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان‌رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.zangiabadi@areeo.ac.ir)
۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2020.15000.0

4- Minimum data set (MDS)

گیری که بتواند فرآیندهای خاک را بیان کند، نظرات مختلفی ارائه شده است اما آنچه مسلم است این مجموعه عوامل را نمی‌توان به صورت کلی برای تمام شرایط تعمیم داد و باید در شرایط خاک‌های مختلف و با اهداف مشخص تحقیقاتی کوچک‌ترین مجموعه داده‌ها را تعیین نمود (۲۱).

رشیدی و همکاران (۱۷)، تعدادی از خصوصیات فیزیکی، زیستی و شیمیایی خاک لوم را در قالب شاخص کیفیت خاک بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که خاک‌های مورد مطالعه از نظر شاخص‌های شیمیایی کیفیت خاک دارای شرایط بسیار مناسب و از نظر شاخص‌های زیستی و فیزیکی نامناسب و بسیار نامناسب بودند.

کی و همکاران (۱۶) با استفاده از ۴۳۱ نمونه خاک از منطقه جیانگسو در چین، کیفیت خاک را در قالب دو روش محاسبه شاخص کیفیت و سه روش انتخاب مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر کیفیت خاک بررسی نمودند. این محققین ۲۲ خصوصیت خاک را به عنوان کل مجموعه داده‌ها[1] در نظر گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که خاک منطقه مورد مطالعه دارای کیفیت ضعیف تا مطلوب بوده و عموماً خاک‌های رده اینسپتی‌سول نسبت به خاک‌های رده انتی‌سول دارای کیفیت بهتری بودند.

ماستو و همکاران (۱۴)، تأثیر مدیریت طولانی مدت تغذیه با انواع کود شیمیایی و آلی در تناوب‌های مختلف بر کیفیت خاک را با استفاده از شاخص کیفیت خاک در هند مطالعه نمودند. این محققین جهت تبدیل مقدار متغیر به امتیاز، از تابع امتیازدهی[2] غیرخطی در قالب سه نوع مقادیر هرچه بیشتر بهتر[3]، هرچه کمتر بهتر[4] و وضعیت بهینه[5] استفاده نمودند. مقدار شاخص کیفیت خاک در این مطالعه در محدوده ۰/۵۵۲ (شاهد بدون کوددهی) تا ۰/۸۳۸ (ترکیب کود نیتروژن، فسفر و پتاسیم با کود دامی) قرار گرفت.

امامی و همکاران (۵)، تغییرات شاخص کیفیت خاک را در اثر افزودن سه سطح ماده آلی از چهار منبع کمپوست زباله شهری، لجن فاضلاب، کود گاوی و کلش گندم به خاک دارای بافت لوم بررسی نمودند. آنها با استفاده از ۱۴ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک و تابع امتیازدهی غیرخطی، شاخص کیفیت خاک را برای کل تیمارها و تیمار شاهد محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که مقدار شاخص کیفیت خاک در تیمار شاهد معادل ۵۲/۷ و کم‌ترین کیفیت بود.

انتخاب شاخص‌های مناسب کیفیت خاک و تجمیع آنها در یک عامل، می‌تواند به تخمین زود هنگام تغییرات کیفیت خاک و در نتیجه اخذ تصمیمات صحیح مدیریتی منابع و اراضی کمک شایانی نماید (۲۵، ۱۰ و ۱۳). در همین راستا، در پژوهش حاضر سعی شد تا با اندازه‌گیری و محاسبه تعداد زیادی از ویژگی‌های فیزیکی خاک و در نهایت تجمیع ویژگی‌های منتخب در قالب شاخص کیفیت فیزیکی خاک[6]، به معیاری جهت طبقه‌بندی خاک محدوده مورد مطالعه از منظر کیفیت فیزیکی دست یافت.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

این مطالعه در ایستگاه تحقیقات طرق مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان‌رضوی با مساحتی حدود ۲۲۰ هکتار واقع در جنوب شرقی شهر مشهد با متوسط ارتفاع ۱۰۱۰ متر از سطح دریا و در مختصات جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه طول‌شرقی و ۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه عرض‌شمالی انجام شد. وجود تنوع در خصوصیات خاک و به طور ویژه بافت خاک در قالب پنج کلاس بافتی لوم، لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی و لوم رسی سیلتی در ایستگاه ذکر شده یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن محسوب می‌گردد (۲۳).

نمونه‌برداری از خاک

در این مطالعه ۳۰ نقطه در قسمت‌های مختلف ایستگاه با بافت، ساختمان و ماده آلی متفاوت (۲۳)، انتخاب شد. از هر نقطه دو نمونه از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری، شامل یک نمونه دست‌خورده و یک نمونه دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فلزی با قطر ۵ و ارتفاع ۵/۳ سانتی‌متر جهت اندازه‌گیری خصوصیات مختلف تهیه گردید.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی

با برازش معادله وان‌گنوختن در قالب نرم‌افزار RETC[7] به داده های منحنی رطوبتی خاک در مکش‌های ۰، ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر (با استفاده از دستگاه جعبه شن[8]) و مکش‌های ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (با استفاده از دستگاه صفحات فشاری) پارامترهای منحنی رطوبتی خاک، محاسبه شد (۱۸ و ۲). توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری (۱۱) و اجزاء شن بر اساس طبقه بندی آمریکایی با استفاده از سری الک‌ها (۱۱)، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی به ترتیب با استفاده از نمونه دست‌نخورده و روش پیکنومتر (۸)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۶) و به منظور

1- Total data set (TDS)
2- Scoring function
3- More is better
4- Less is better
5- Optimum
6- Soil physical quality index (SPQI)
7- Retention curve program
8- Sand box

تعیین میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (روش الک خشک)، از سری الک ها (۱۲) در اندازه‌های ۹۵۰۰ میکرومتر، ۶۷۳۰ میکرومتر (مش ۳)، ۲۰۰۰ میکرومتر (مش ۱۰)، ۱۰۰۰ میکرومتر (مش ۱۸)، ۵۰۰ میکرومتر (مش ۳۵) و ۲۵۰ میکرومتر (مش ۶۰) استفاده شد. جهت تعیین مقاومت فروروی خاک از فروسنج[1] مخروطی ساخت شرکت Eijkelkamp با قابلیت اندازه‌گیری و ثبت مقاطع یک سانتی‌متری تا عمق ۵۰ سانتی‌متر و مخروط دارای زاویه ۶۰ درجه و سطح مقطع یک سانتی‌متر مربع، استفاده گردید. این اندازه‌گیری در محل‌هایی نزدیک به محل برداشت نمونه خاک دست‌خورده و دست‌نخورده انجام شد. همزمان با هر اندازه‌گیری، یک نمونه خاک جهت تعیین رطوبت به روش وزنی تهیه گردید. در نهایت خصوصیات مختلف فیزیکی خاک شامل شاخص پایداری خاک‌دانه در قالب نسبت کربن آلی به مجموع رس و سیلت خاک (۱۹)، شاخص S از طریق محاسبه شیب منحنی رطوبتی خاک در حالت خشک شدن در نقطه عطف آن (۲۹)، تخلخل و گنجایش هوایی (۳۰)، شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ[2] (۱۹ و ۲۸)، ظرفیت مزرعه نسبی در قالب نسبت رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه به رطوبت در نقطه اشباع (۳۰)، آب قابل استفاده و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت[3] ۱۰۰ و ۳۳۰ (ظرفیت مزرعه در دو مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر) (۲، ۲۸ و ۲۹)، گنجایش انتگرالی آب[4] (۳۰) و انرژی انتگرالی[5] دامنه‌های مختلف رطوبتی (۳، ۲۸ و ۲۹) با استفاده از روابط مربوطه که مفصلاً در منابع توضیح داده شده است، محاسبه گردید.

تجزیه‌های آماری

جهت تعیین روابط همبستگی پیرسون و تجزیه مؤلفه‌های اصلی[6] از نرم‌افزار آماری JMP نسخه ۹/۰۲ استفاده گردید.

تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک

در این تحقیق تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک، در قالب چهار مرحله به شرح زیر انجام شد:

۱- انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک

تجزیه مؤلفه‌های اصلی یکی از رایج‌ترین روش‌های خلاصه‌سازی و کاهش تعداد متغیرها می‌باشد. در این روش از بین کل متغیرهای بررسی شده، تعدادی متغیر انتخاب شده که این متغیرها می‌توانند قسمت اعظم واریانس را در کل نمونه‌های مورد مطالعه توجیه نمایند. به این متغیرها، متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده اطلاق می‌شود. عموماً این تجزیه با استفاده از ماتریس همبستگی متغیرها انجام می گردد. جهت تعیین کوچک‌ترین مجموعه داده، مقادیر بردارهای ویژه[7] در مؤلفه‌های دارای مقادیر ویژه[8] بزرگ‌تر از یک ملاک عمل می‌باشد. به‌گونه‌ای که در گام اول متغیرهای دارای بزرگ‌ترین مقادیر بردارهای ویژه بدون در نظر گرفتن علامت مثبت یا منفی در هر مؤلفه انتخاب می‌شوند. بزرگ‌ترین مقادیر بردارهای ویژه در هر مؤلفه، شامل مقادیری است که حداکثر ۱۰ درصد کوچک‌تر از بزرگ‌ترین بردار در هر مؤلفه باشند. در گام بعد تعداد متغیر انتخاب شده در هر مؤلفه، ملاک تعیین کوچک‌ترین مجموعه داده قرار می‌گیرد. در این راستا در مؤلفه‌هایی که فقط یک متغیر انتخاب شده است، همان متغیر به عنوان یکی از متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده در نظر گرفته شده ولی در مؤلفه‌های با بیش از یک متغیر منتخب در هر مؤلفه، از ضریب همبستگی ساده بین متغیرهای انتخاب شده و همچنین بین این متغیرها و مؤلفه مربوطه استفاده می‌گردد. در شرایطی که بین متغیرهای انتخاب شده در هر مؤلفه، رابطه همبستگی معنی‌دار مشاهده نشود، کلیه متغیرهای انتخاب شده در آن مؤلفه به عنوان متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده در نظر گرفته می‌شوند ولی در شرایطی که بین این متغیرها رابطه همبستگی معنی‌دار وجود داشته باشد، ضرایب همبستگی متغیرهای منتخب با مؤلفه مربوطه بررسی می‌گردد و متغیری که دارای بالاترین ضریب همبستگی با مؤلفه مربوطه باشد، به عنوان یکی از متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده در نظر گرفته می‌شود (۱۶).

۲- وزن‌دهی[9] ویژگی‌های منتخب

وزن هر متغیر وارد شده به کوچک‌ترین مجموعه داده حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی بر روی ماتریس همبستگی از طریق محاسبه نسبت واریانس جزئی مؤلفه مربوط به آن متغیر به واریانس تجمعی مجموع مؤلفه‌های اصلی با مقدار ویژه بزرگ‌تر از یک، تعیین گردید (۱۵).

۳- امتیازدهی ویژگی‌های منتخب

با توجه به تفاوت واحدهای متغیرهای منتخب و به منظور بدون واحد نمودن این متغیرها (تبدیل مقدار به امتیاز)، از توابع امتیازدهی استفاده شد. توابع امتیازدهی دارای سه شکل کلی صعودی (مقادیر

1- Penetrometer
2- Pore size distribution (PSD)
3- Least limiting water range (LLWR)
4- Integral water capacity (IWC)
5- Integral energy (EI)
6- Principal component (PC)

7- Eigen vectors
8- Eigen values
9- Weighting

بیشتر بهتر)، نزولی (مقادیر کمتر بهتر) و زنگوله‌ای (مقادیر بهینه بهتر) می‌باشند. روش‌های مختلفی برای تعیین و انتخاب توابع امتیازدهی وجود دارد که همگی آنها مبتنی بر ذهن و تجربه محقق و استفاده از حدود بحرانی گزارش شده در منابع می‌باشد. توابع امتیازدهی دارای دو شکل کلی خطی و غیرخطی می‌باشند. در این مطالعه از دو روش امتیازدهی خطی جهت تبدیل مقادیر متغیرها به امتیاز، استفاده گردید (۲۷ و ۱۵).

الف- روش اول (دامنه ۱-۰/۱)

در این روش مقادیر امتیازات بین ۰/۱ تا یک متغیر است (۲۷). جهت تبدیل مقادیر متغیرها به امتیاز در این روش، از روابط شماره ۱ و ۲ به‌ترتیب برای مقادیر بیشتر، بهتر و مقادیر کمتر، بهتر و در شرایط بهینه، از تلفیق دو رابطه استفاده گردید.

$$S_i = 0.1 + ((X_i - B_i)/(A_i - B_i)) * 0.9 \quad (۱)$$

$$S_i = 1 - ((X_i - B_i)/(A_i - B_i)) * 0.9 \quad (۲)$$

که در آنها Si: امتیاز متغیر، Xi: مقدار متغیر، Ai: حداکثر مقدار مشاهده شده متغیر و Bi: حداقل مقدار مشاهده شده متغیر می‌باشد.

ب- روش دوم (دامنه ۱-۰)

در این روش امتیازات متغیرها دارای دامنه‌ای بین صفر و یک می‌باشد (۱۵). به‌منظور امتیازبندی متغیرها در این روش، از روابط شماره ۳ و ۴ به‌ترتیب برای مقادیر بیشتر، بهتر و مقادیر کمتر، بهتر و در شرایط بهینه، از تلفیق دو رابطه استفاده شد.

$$S_i = (X_i - B_i)/(A_i - B_i) \quad (۳)$$

$$S_i = 1 - (X_i - B_i)/(A_i - B_i) \quad (۴)$$

که در آنها Si: امتیاز متغیر، Xi: مقدار متغیر، Ai: حداکثر مقدار مشاهده شده متغیر و Bi: حداقل مقدار مشاهده شده متغیر می‌باشد.

۴- محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی خاک

در این مطالعه شاخص کیفیت فیزیکی خاک با استفاده از روابط شماره ۵ و ۶ محاسبه گردید. در رابطه شماره ۵ متغیرهای منتخب دارای وزن برابر و معادل یک بوده و در واقع شاخص کیفیت فیزیکی خاک، معادل میانگین امتیاز متغیرهای منتخب می‌باشد ولی در رابطه شماره ۶، وزن هرمتغیر در محاسبات لحاظ شده است.

$$SPQI = (\sum_{i=1}^{n} S_i)/n \quad (۵)$$

$$SPQI = \sum_{i=1}^{n} W_i S_i \quad (۶)$$

که در آنها SPQI: شاخص کیفیت فیزیکی خاک، Si: امتیاز هر متغیر، Wi: وزن هر متغیر، و n: تعداد متغیرهای منتخب می‌باشد (۱۵).

در هر دو رابطه، مقدار شاخص کیفیت فیزیکی خاک بین صفر و یک متغیر است. بر این اساس خاک‌های با مقادیر شاخص نزدیک به یک مطلوب‌ترین خاک‌ها از نظر کیفیت فیزیکی و خاک‌های با مقادیر شاخص نزدیک به صفر ضعیف‌ترین خاک‌ها از این نظر محسوب می شوند.

جهت مقایسه روش‌های مختلف محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی خاک از ضریب حساسیت استفاده شد. این ضریب با استفاده از رابطه شماره ۷ قابل محاسبه می‌باشد.

$$Sensitivity = SPQI_{(max)}/SPQI_{(min)} \quad (۷)$$

که در آن Sensitivity: ضریب حساسیت، SPQI(max): بزرگ ترین شاخص کیفیت فیزیکی خاک در هر روش، SPQI(min): کوچک‌ترین شاخص کیفیت فیزیکی خاک در همان روش می‌باشد (۱۵). بر این اساس روش‌های با مقادیر ضریب حساسیت بزرگ‌تر، مناسب‌تر بوده و اختلاف بین خاک‌های مختلف را بهتر نشان می دهند.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که فراوانی خاک‌های با بافت لوم ۴۰ درصد، لوم سیلتی ۲۳ درصد، لوم رسی سیلتی ۱۷ درصد، لوم رسی ۱۳ درصد و لوم شنی ۷ درصد بود. جرم مخصوص ظاهری در نمونه خاک‌های مطالعه شده دارای دامنه‌ای بین ۱/۵۶-۱/۲۹ و میانگین ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و کربن آلی دارای دامنه‌ای بین ۱/۰۵- ۰/۲۶ و میانگین ۰/۵۳ درصد بود. توزیع اندازه خاک‌دانه در نمونه‌های بررسی شده نشان داد که به طور میانگین خاک‌دانه‌های با قطر ۱-۰/۵ میلی متر بیشترین سهم و خاک‌دانه‌های با قطر ۰/۲۵-۰ میلی‌متر کمترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. مقدار شاخص میانگین وزنی قطر خاک‌دانه نیز دارای دامنه‌ای بین ۲/۸۸-۰/۹۴ میلی‌متر و میانگینی برابر با ۱/۹۳ میلی‌متر بود.

تجزیه مؤلفه‌های اصلی با استفاده از ماتریس همبستگی

جدول ۱، نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی با استفاده از ماتریس همبستگی برای ۳۵ متغیر را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مقدار ویژه در شش مؤلفه اول بزرگتر از یک بوده، لذا در این مطالعه، مؤلفه های اول تا ششم جهت کاهش تعداد متغیرها و تعیین کوچک‌ترین مجموعه داده استفاده شد. سطرهای دوم و سوم جدول ۱ به‌ترتیب درصد جزئی و تجمعی واریانس قابل توجیه توسط هر مؤلفه را نشان می‌دهد. بر این اساس سه مؤلفه اول به‌ترتیب ۳۷/۲۱، ۲۱/۱۹ و ۱۳/۹۵ درصد واریانس و در مجموع ۷۲/۳۵ درصد کل واریانس را در خاک‌های مطالعه‌شده توجیه می‌کنند و در نهایت با در نظرگرفتن شش مؤلفه اول حدود ۹۰ درصد واریانس قابل توجیه است.

جدول ۱- تجزیه مؤلفه‌های اصلی با استفاده از ماتریس همبستگی

Table 1- Principle component analysis using correlation matrix

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6
مقدار ویژه (Eigen Value)	13.025	7.417	4.883	3.261	1.683	1.053
درصد (Percent)	37.214	21.190	13.950	9.318	4.808	3.009
درصد تجمعی (Cum Percent)	37.214	58.404	72.354	81.672	86.480	89.489
ویژگی‌های فیزیکی خاک (Soil Physical Properties)	بردار ویژه (Eigen Vectors)					
جرم مخصوص ظاهری (D_b)	0.012	0.118	-0.363	0.064	0.232	-0.005
شن خیلی درشت (VC Sand)	0.101	0.213	0.229	-0.126	0.035	-0.194
شن درشت (C Sand)	0.198	0.208	0.110	-0.027	0.016	-0.059
شن متوسط (M Sand)	0.233	0.120	-0.087	0.144	0.041	0.100
شن ریز (F Sand)	0.231	0.067	-0.139	0.163	0.023	0.118
شن خیلی ریز (VF Sand)	0.202	-0.010	-0.181	0.135	-0.095	0.230
شن (Sand)	0.247	0.126	-0.063	0.109	0.011	0.081
سیلت (Silt)	-0.228	-0.116	0.102	-0.148	-0.107	0.021
رس (Clay)	-0.219	-0.111	-0.008	-0.028	0.132	-0.211
کربن آلی (OC)	-0.176	-0.012	0.126	0.135	-0.505	0.018
شاخص پایداری خاک‌دانه (SI)	-0.079	0.057	0.134	0.198	-0.603	0.086
میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (MWD)	-0.122	-0.180	0.010	-0.015	0.218	0.104
شاخص S (Sgi)	0.186	-0.242	0.041	0.083	-0.104	0.015
تخلخل کل (POR_T)	-0.003	-0.143	0.377	-0.067	-0.004	0.161
تخلخل منافذ درشت (POR_P)	0.083	0.193	0.298	-0.160	0.099	0.182
تخلخل منافذ ریز (POR_m)	-0.086	-0.306	0.043	0.106	-0.136	-0.067
گنجایش هوایی کل (AC_T)	0.212	-0.110	0.243	-0.036	0.042	-0.091
گنجایش هوایی منافذ ریز (AC_m)	0.182	-0.245	0.088	0.060	-0.034	-0.216
میانه قطر منافذ (D_{median})	0.225	0.130	0.127	-0.058	-0.066	0.073
مد قطر منافذ (D_{mode})	0.135	0.235	0.173	-0.132	-0.015	0.153
میانگین قطر منافذ (D_{mean})	0.262	0.027	0.022	0.025	-0.112	-0.049
انحراف‌معیار توزیع قطر منافذ (SD)	-0.157	0.252	-0.024	-0.025	-0.071	-0.279
کشیدگی توزیع قطر منافذ (Skewness)	0.192	-0.192	-0.170	0.101	-0.102	-0.112
افراشتگی توزیع قطر منافذ (Kurtosis)	0.104	-0.219	0.086	-0.032	0.077	0.111
ظرفیت مزرعه نسبی (RFC)	-0.243	0.091	-0.169	0.024	-0.041	0.123
آب قابل استفاده ۱۰۰ (PAW_{100})	-0.074	-0.311	-0.037	0.042	0.072	0.080
آب قابل استفاده ۳۳۰ (PAW_{330})	-0.237	0.029	-0.037	-0.013	0.030	0.425
دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ۱۰۰ ($LLWR_{100}$)	-0.027	-0.187	0.056	0.407	0.198	-0.104
دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ۳۳۰ ($LLWR_{330}$)	-0.189	0.105	0.058	0.299	0.131	0.265
گنجایش انتگرالی آب (IWC)	0.087	-0.143	0.309	0.206	0.173	0.165
انرژی انتگرالی آب قابل استفاده ۱۰۰ (EI PAW_{100})	-0.210	0.147	0.159	-0.104	0.090	0.123
انرژی انتگرالی آب قابل استفاده ۳۳۰ (EI PAW_{330})	-0.094	-0.095	0.288	-0.106	0.186	-0.224
انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ۱۰۰ (EI $LLWR_{100}$)	-0.077	0.201	0.164	0.371	0.095	-0.022
انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ۳۳۰ (EI $LLWR_{330}$)	-0.007	0.118	0.204	0.437	0.101	-0.164
انرژی انتگرالی گنجایش انتگرالی آب (EI IWC)	-0.168	0.202	0.031	0.289	0.049	-0.084

جهت تعیین کوچک‌ترین مجموعه داده، ابتدا بزرگترین مقادیر بردارهای ویژه در هر مؤلفه انتخاب شد. این بردارها به صورت زیرخط در شش مؤلفه اول جدول ۱ نشان داده شده است. در گام بعد تعداد متغیر انتخاب شده در هر مؤلفه بررسی شد. در این راستا در مؤلفه

پنجم و ششم که فقط یک متغیر در هر مؤلفه انتخاب شد، همان متغیرها به عنوان یکی از متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده در نظر گرفته شدند ولی در مؤلفه‌های اول، دوم، سوم و چهارم که بیش از یک متغیر در هر مؤلفه، واجد شرایط بزرگترین مقادیر بردار ویژه در آن مؤلفه بودند، از ضریب همبستگی ساده بین متغیرهای انتخاب شده و همچنین بین این متغیرها و مؤلفه مربوطه استفاده گردید. نتایج بررسی رابطه همبستگی بین متغیرهای منتخب در مؤلفه‌های اول، دوم، سوم و چهارم و همچنین بین این متغیرها و مؤلفه مربوطه در جدول ۲ نشان داده شده است.

نتایج نشان داد که در مؤلفه‌های اول، دوم، سوم و چهارم ضریب همبستگی بسیار قوی بین متغیرهای منتخب در هر مؤلفه وجود دارد، لذا از ضریب همبستگی هر متغیر با مؤلفه مربوطه به عنوان ابزاری جهت کاهش تعداد متغیرها استفاده شد. بر این اساس، شاخص میانگین قطر منافذ، آب قابل استفاده (۱۰۰)، تخلخل کل و انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۳۳۰) به‌ترتیب با بزرگترین ضریب همبستگی با مؤلفه‌های اول، دوم، سوم و چهارم به عنوان متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده انتخاب شدند.

جدول ۳ متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده بر اساس نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی با استفاده از ماتریس همبستگی و مقادیر آنها را نشان می‌دهد. نتایج این بررسی نشان داد که به‌جای استفاده از ۳۵ متغیر، تنها شش ویژگی فیزیکی خاک می‌توانند حدود ۹۰ درصد مجموع واریانس خاک‌های مورد مطالعه را توجیه نمایند. مشابه این نتیجه در خصوص تخلخل کل و آب قابل استفاده قبلاً توسط شون هولتز و همکاران (۲۴) و رینولدز و همکارن (۲۰) نیز گزارش شده است.

گوارتز و همکاران (۷) نیز در راستای تعیین کوچک‌ترین مجموعه داده‌ها برای بررسی کیفیت خاک در تناوب گندم-ذرت گزارش نمودند که چهار خصوصیت فیزیکی شامل نفوذپذیری سطحی، پایداری خاک‌دانه، رطوبت پژمردگی دائم و مقاومت فروروی خاک سطحی و خصوصیات شیمیایی شامل مقادیر کربن آلی، نیتروژن، پتاسیم و روی در خاک سطحی (۵-۰ سانتی‌متر) و مقادیر کربن آلی و نیتروژن در خاک با عمق ۲۰-۵ سانتی‌متر، به‌عنوان کوچک‌ترین مجموعه داده‌ها جهت بررسی کیفیت خاک با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی انتخاب شدند.

وزن ویژگی‌های فیزیکی منتخب

وزن متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی با استفاده از ماتریس همبستگی در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیش‌ترین وزن متغیر مربوط به مؤلفه اول و کم‌ترین آن مربوط به مؤلفه ششم می‌باشد.

جدول ۲- ضرائب همبستگی بین متغیرهای منتخب در مؤلفه‌های اول، دوم، سوم و چهارم و همچنین بین این متغیرها و مؤلفه اصلی مربوطه

Table 2- Correlation coefficients of selected variables in PC1, PC2, PC3 and PC4 and related principal components

	Sand	D_{mean}	RFC	PAW_{330}	PC1	POR_m	PAW_{100}	PC2	D_b	POR_T	PC3	$LLWR_{100}$	EI $LLWR_{330}$	PC4
Sand	1													
D_{mean}	0.84**	1												
RFC	-0.63**	-0.81**	1											
PAW_{330}	-0.70**	-0.83**	0.85**	1										
PC1	0.89**	0.94**	-0.88**	-0.85**	1									
POR_m						1								
PAW_{100}						0.69**	1							
PC2						-0.83**	-0.85**	1						
D_b									1					
POR_T									-0.87**	1				
PC3									-0.80**	0.83**	1			
$LLWR_{100}$												1		
EI $LLWR_{330}$												0.50*	1	
PC4												0.73**	0.79**	1

**: معنی‌دار در سطح ۱٪   * : معنی‌دار در سطح ۵٪   ns : غیرمعنی‌دار

**: significant ($P < 0.01$), *: significant ($P < 0.05$), ns: non-significant

جدول ۳- متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی و مقادیر آنها

Table 3- The variables of minimum data set using principle component analysis

مؤلفه اصلی (PC)	متغیر منتخب Selected variable	واحد Unit	حداکثر Max	حداقل Min	میانگین Mean
مؤلفه اول (PC1)	میانگین قطر منافذ (D_{mean})	µm	25.1	0.5	6.5
مؤلفه دوم (PC2)	آب قابل استفاده ۱۰۰ (PAW_{100})	$cm^3\ cm^{-3}$	0.23	0.12	0.20
مؤلفه سوم (PC3)	تخلخل کل (POR_T)	$cm^3\ cm^{-3}$	0.51	0.40	0.46
مؤلفه چهارم (PC4)	انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ۳۳۰ ($EI\ LLWR_{330}$)	$J\ kg^{-1}$	270	47	184
مؤلفه پنجم (PC5)	شاخص پایداری خاک‌دانه (SI)	%	2.61	0.76	1.30
مؤلفه ششم (PC6)	آب قابل استفاده ۳۳۰ (PAW_{330})	$cm^3\ cm^{-3}$	0.20	0.10	0.16

جدول ٤- وزن متغیرهای کوچک‌ترین مجموعه داده حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی

Table 4- The variable weights of minimum data set using principle component analysis

مؤلفه اصلی (PC)	متغیر منتخب Selected variable	درصد Percent	وزن Weight
مؤلفه اول (PC1)	میانگین قطر منافذ (D_{mean})	0.37	0.41
مؤلفه دوم (PC2)	آب قابل استفاده ۱۰۰ (PAW_{100})	0.21	0.23
مؤلفه سوم (PC3)	تخلخل کل (POR_T)	0.14	0.16
مؤلفه چهارم (PC4)	انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ۳۳۰ ($EI\ LLWR_{330}$)	0.09	0.10
مؤلفه پنجم (PC5)	شاخص پایداری خاک‌دانه (SI)	0.05	0.06
مؤلفه ششم (PC6)	آب قابل استفاده ۳۳۰ (PAW_{330})	0.03	0.04
مجموع (Sum)		0.89	1

امتیاز ویژگی‌های فیزیکی منتخب

جهت حذف واحدهای مختلف متغیرهای منتخب و بدون واحد نمودن آنها از روش امتیازدهی استفاده شد. جهت امتیازدهی متغیرهای آب قابل استفاده (۱۰۰)، تخلخل کل، شاخص پایداری خاک‌دانه و آب قابل استفاده (۳۳۰) از تابع صعودی (مقادیر بیشتر، بهتر)، برای متغیر انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۳۳۰)، از تابع نزولی (مقادیر کمتر، بهتر) و برای متغیر میانگین قطر منافذ از تابع زنگوله‌ای (مقادیر بهینه، بهتر) استفاده گردید. مقدار بهینه میانگین قطر منافذ خاک بر اساس نتایج مطالعه رینولدز و همکاران (۱۹)، در دامنه ۰/۷ تا ۲ میکرومتر در نظر گرفته شد.

شکل ۱ توابع امتیازدهی متغیرها به‌عنوان نمونه برای روش دوم (دامنه ۱-۰) و جدول ۵ روابط لازم جهت محاسبه امتیاز متغیرها با استفاده از دو روش خطی را نشان می‌دهد. در جدول ۵، Xi معادل مقدار هر متغیر و Si معادل امتیاز متناظر با مقدار آن متغیر می‌باشد.

رشیدی و همکاران (۱۷) نیز شاخص پایداری خاک‌دانه و آب قابل استفاده را به‌عنوان شاخص‌های فیزیکی، کربن آلی و کربن فعال را به‌عنوان شاخص‌های زیستی و واکنش خاک و فسفر و پتاسیم قابل استفاده را به‌عنوان شاخص‌های شیمیایی کیفیت خاک در ۱۲۰ نمونه تهیه شده از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری و مقادیر هر متغیر را با استفاده از توابع امتیازدهی بین ۰ تا ۱۰۰ امتیازبندی نمودند.

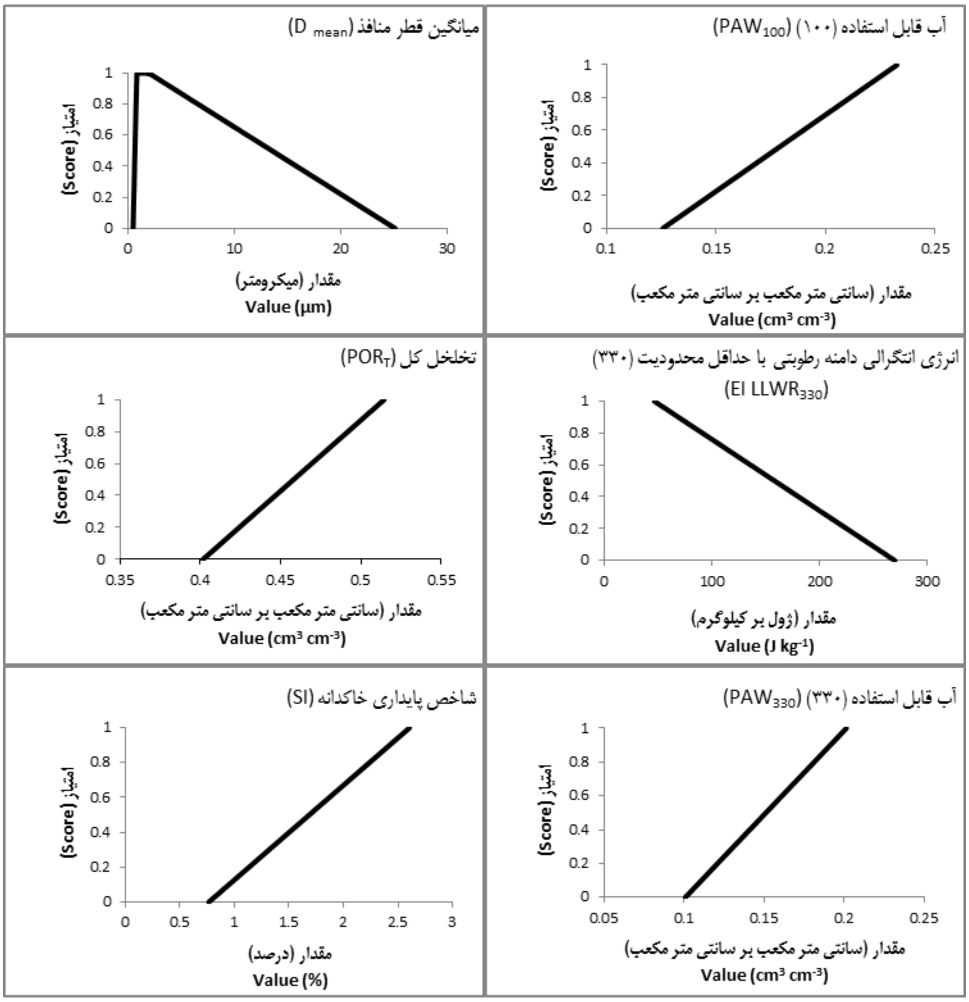
شاخص کیفیت فیزیکی خاک

شاخص کیفیت فیزیکی خاک‌های مطالعه‌شده با استفاده از روابط شماره ۸ و ۹ محاسبه شد (۱۵). در رابطه ۸، متغیرهای کیفیت فیزیکی خاک دارای ارزش برابر بوده ولی در رابطه ۹ ارزش متغیرها متفاوت است.

$$SPQI = (S_{mean} + S_{PAW100} + S_{POR} + S_{EI\,LLWR330} + S_{SI} + S_{PAW330})/6 \quad (8)$$

$$SPQI = 0.41 * S_{mean} + 0.23 * S_{PAW100} + 0.16 * S_{POR} + 0.10 * S_{EI\,LLWR330} + 0.06 * S_{SI} + 0.04 * S_{PAW330} \quad (9)$$

در این روابط SPQI معادل شاخص کیفیت فیزیکی خاک و S_{mean}، S_{PAW100}، S_{POR}، $S_{EI\ LLWR330}$، S_{SI} و S_{PAW330} به‌ترتیب امتیاز متغیرهای میانگین قطر منافذ، آب قابل استفاده (۱۰۰)، تخلخل کل، انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۳۳۰)، شاخص پایداری خاک‌دانه و آب قابل استفاده (۳۳۰) می‌باشد. مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین شاخص فیزیکی کیفیت ۳۰ نمونه خاک مورد مطالعه در جدول ۶ نشان داده شده است.



شکل ۱- توابع امتیازدهی متغیرهای منتخب (دامنه ۱-۰)

Figure 1- Scoring functions of selected variables (Range: 0-1)

مقایسه ضرایب حساسیت بین روش‌های مختلف تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک در این مطالعه نشان داد که روش وزن‌دهی به متغیرهای انتخاب‌شده از طریق تجزیه مؤلفه‌های اصلی و امتیازدهی آنها با استفاده از روش دوم (دامنه ۱-۰) دارای بیش‌ترین ضریب حساسیت بوده و لذا تفاوت کیفیت فیزیکی خاک‌های مطالعه‌شده را بهتر نشان می‌دهد. بر اساس روش ذکر شده، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار شاخص کیفیت فیزیکی خاک در محدوده مورد مطالعه به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۱۲ محاسبه گردید.

کی و همکاران (۱۶) خاک‌های مختلف را بر اساس مقدار شاخص کیفیت خاک به چهار کلاس (یک بیش‌ترین کیفیت و چهار کم‌ترین کیفیت) دسته‌بندی نمودند. این محققین در روش محاسبه شاخص کیفیت خاک با استفاده از وزن‌دهی به متغیرهای انتخاب‌شده از طریق تجزیه مؤلفه‌های اصلی و امتیازدهی آنها، برای مقادیر شاخص بیشتر از ۰/۷۸ کلاس یک، ۰/۷۸-۰/۶۸ کلاس دو، ۰/۶۸-۰/۵۸ کلاس سه و مقادیر شاخص کمتر از ۰/۵۸ کلاس چهار در نظر گرفتند.

نتایج این مطالعه نشان داد که با در نظر گرفتن چهار کلاس کیفیت خاک، ۱۰ درصد خاک‌های مطالعه شده در کلاس یک، ۳۶/۷ درصد کلاس دو، ۳۰ درصد کلاس سه و ۲۳/۳ درصد در کلاس چهار طبقه‌بندی می‌گردند.

شاخص کیفیت فیزیکی خاک مقداری نسبی است و به‌عنوان ابزاری جهت مقایسه نمونه‌های بررسی شده کاربرد دارد. لذا نتایج ارائه شده در جدول ۶ فقط برای ۳۰ نمونه خاک مورد مطالعه با ویژگی‌های ارائه شده در جدول ۳ قابل استفاده بوده و جهت تعیین این شاخص در مطالعات مشابه، نیاز به تعیین متغیرها، امتیازدهی و محاسبات مجدد است.

جدول ۵- محاسبه امتیاز متغیرهای منتخب با استفاده از دو روش خطی در قالب سه نوع تابع امتیازدهی
Table 5- Calculation of the selected variables scores using two linear methods and three types of scoring functions

متغیر منتخب Selected variable	نوع تابع امتیازدهی Scoring function type	امتیاز Score Range: 0.1-1	 Range: 0 -1
میانگین قطر منافذ (D_{mean})	بهینه (Optimum)	$D_{mean} < 0.7$ µm $S_{mean} = 0.1 + ((X_{mean} - 0.52)/(0.70 - 0.52)) * 0.9$ $0.7 \le D_{mean} \le 2$ µm $S_{mean} = 1$ $D_{mean} > 2$ µm $S_{mean} = 1 - ((X_{mean} - 2)/(25.14 - 2)) * 0.9$	$D_{mean} < 0.7$ µm $S_{mean} = (X_{mean} - 0.52)/(0.70 - 0.52)$ $0.7 \le D_{mean} \le 2$ µm $S_{mean} = 1$ $D_{mean} > 2$ µm $S_{mean} = 1 - (X_{mean} - 2)/(25.14 - 2)$
آب قابل استفاده ۱۰۰ (PAW_{100})	بیشتر، بهتر (More is better)	$S_{PAW100} = 0.1 + ((X_{PAW100} - 0.13)/(0.23 - 0.13)) * 0.9$	$S_{PAW100} = (X_{PAW100} - 0.13)/(0.23 - 0.13)$
تخلخل کل (POR_T)	بیشتر، بهتر (More is better)	$S_{POR} = 0.1 + ((X_{POR} - 0.40)/(0.51 - 0.40)) * 0.9$	$S_{POR} = (X_{POR} - 0.40)/(0.51 - 0.40)$
انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ۳۳۰ ($EI\ LLWR_{330}$)	کمتر، بهتر (Less is better)	$S_{EI\ LLWR330} = 1 - ((X_{EI\ LLWR330} - 46.6)/(270.2 - 46.6)) * 0.9$	$S_{EI\ LLWR330} = 1 - (X_{EI\ LLWR330} - 46.6)/(270.2 - 46.6)$
شاخص پایداری خاک‌دانه (SI)	بیشتر، بهتر (More is better)	$S_{SI} = 0.1 + ((X_{SI} - 0.76)/(2.61 - 0.76)) * 0.9$	$S_{SI} = (X_{SI} - 0.76)/(2.61 - 0.76)$
آب قابل استفاده ۳۳۰ (PAW_{330})	بیشتر، بهتر (More is better)	$S_{PAW330} = 0.1 + ((X_{PAW330} - 0.10)/(0.20 - 0.10)) * 0.9$	$S_{PAW330} = (X_{PAW330} - 0.10)/(0.20 - 0.10)$

جدول ٦- مقادیر شاخص کیفیت فیزیکی خاک‌های مطالعه‌شده
Table 6- Soil physical quality index values of studied soils

روش امتیازدهی Scoring method	Range: 0.1-1		Range: 0 -1	
وزن‌دهی Weighting	بدون وزن Unweighted	وزن‌دار Weighted	بدون وزن Unweighted	وزن‌دار Weighted
حداکثر (Max)	0.78	0.84	0.75	0.82
حداقل (Min)	0.28	0.21	0.20	0.12
میانگین (Mean)	0.58	0.67	0.54	0.64
دامنه تغییرات (Range)	0.50	0.63	0.55	0.70
ضریب حساسیت (Sensitivity)	2.87	4	3.75	6.83

رومانیک و همکاران (۲۲) نیز هفده ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تعیین و با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی، تعداد پنج ویژگی را جهت محاسبه شاخص کیفیت خاک انتخاب کردند. این محققین مقادیر ویژگی‌های انتخاب‌شده را با استفاده از روش خطی، امتیازبندی نموده و با در نظر گرفتن وزن هر متغیر، شاخص کیفیت خاک را محاسبه نمودند. کی و همکاران (۱۶) معتقدند که با وجود این‌که استفاده از کل مجموعه متغیرها، منجر به حصول نتایج دقی‌تری می‌گردد، ولی محاسبه شاخص کیفیت خاک با استفاده از کوچک‌ترین مجموعه داده‌ها، صرفه‌جویی در وقت و هزینه را به دنبال دارد. آپاریسیو و کاستا (۱) نیز معتقدند که ترکیب سه شاخص کیفیت خاک شامل تغییر میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، شاخص (S) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌تواند قسمت اعظم تغییرات تعداد سالی که خاک تحت کشت مداوم بوده است را توجیه نماید. گلوور و همکاران (۶) از شاخص کیفیت خاک جهت مقایسه تأثیر روش‌های مختلف مدیریت باغات سیب بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک استفاده نمودند. آنها گزارش نمودند که شاخص کیفیت خاک در مدیریت تلفیقی معادل ۰/۹۲ و در مدیریت رایج ۰/۷۸ بود که نشان دهنده تأثیر معنی‌دار مدیریت تلفیقی بر کیفیت خاک می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که از بین ۳۵ ویژگی فیزیکی مطالعه شده، شش ویژگی شامل میانگین قطر منافذ، آب قابل استفاده (۱۰۰)، تخلخل کل و انرژی انتگرالی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۳۳۰)، شاخص پایداری خاک‌دانه و آب قابل استفاده (۳۳۰) در قالب کوچک‌ترین مجموعه داده می‌توانند حدود ۹۰ درصد تفاوت بین خاک‌های محدوده مورد مطالعه را توجیه نمایند. لذا استفاده از کوچک‌ترین مجموعه داده به جای کل متغیرهای بررسی شده، صرفه‌جویی در وقت و هزینه را به دنبال دارد. در این مطالعه جهت محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی خاک از توابع امتیازدهی در راستای حذف واحدهای مختلف شش ویژگی منتخب و اعمال وزن هر ویژگی در رابطه نهایی استفاده گردید. نتایج حاکی از آن بود که امتیازبندی متغیرها با استفاده از روش دارای دامنه امتیاز بین صفر و یک و وزن دهی آنها با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی، شاخص مناسب‌تری را جهت بررسی تفاوت کیفیت فیزیکی خاک‌های مطالعه شده ارائه می‌کند. نتایج نشان داد که ۱۰ درصد خاک‌های مورد مطالعه در کلاس یک، ۳۶/۷ درصد کلاس دو، ۳۰ درصد کلاس سه و ۲۳/۳ درصد در کلاس چهار طبقه‌بندی می‌شوند. در این طبقه‌بندی خاک‌های قرار گرفته در کلاس یک بیش‌ترین و خاک‌های قرار گرفته در کلاس چهار کم‌ترین کیفیت فیزیکی را دارا می‌باشند.

منابع

1. Aparicio V., and Costa J.L. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. Soil & Tillage Research 96: 155–165.
2. Asgarzadeh H., Mosaddeghi M.R., Mahboubi A.A., Nosrati A., and Dexter A.R. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. Plant Soil 335: 229–244.
3. Asgarzadeh H., Mosaddeghi M.R., Mahboubi A.A., Nosrati A., and Dexter A.R. 2011. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. Geoderma 166: 34–42.
4. Bhardwaj A.K., Jasrotia P., Hamilton S.K., and Robertson G.P. 2011. Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity. Agriculture, Ecosystems and Environment 140: 419–429.
5. Emami H., Astaraei A.R., and Fotovat A. 2014. Evaluating the effect of organic matter on soil quality score functions. Journal of Water and Soil 28(3): 565–574. (in Persian with English abstract)
6. Glover J.D., Reganold J.P., and Andrews P.K. 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. Agriculture, Ecosystems and Environment 80: 29–45.
7. Govaerts B., Sayre K.D., and Deckers J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. Soil & Tillage Research 87: 163–174.
8. Hao X., Ball B.C., Culley J.L.B., Carter M.R., and Parkin G.W. 2007. Soil density and porosity. p. 743-760. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
9. Imaz M.J., Virto I., Bescansa P., Enrique A., Fernandez-Ugalde O., and Karlen D.L. 2010. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. Soil & Tillage Research 107: 17–25.
10. Karlen D.L., Hurley E.G., Andrews S.S., Cambardella C.A., Meek D.W., Duffy M.D., and Mallarino A.P. 2006. Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. Agronomy Journal 98: 484–495.
11. Kroetsch D., and Wang C. 2007. Particle size distribution. p. 713–725. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
12. Larney F.J. 2007. Dry-aggrigate size distribution. p. 821–831. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
13. Mandal U.K., Warrington D.N., Bhardwaj A.K., Bar-Tal A., Kautzky L., Minz D., and Levy G.J. 2008. Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis. Geoderma 144: 189–197.
14. Masto R.E., Chhonkar P.K., Singh D., and Patra A.K. 2007. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. Agriculture, Ecosystems and Environment 118: 130–142.
15. Masto R.E., Chhonkar P.K., Singh D., and Patra A.K. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. Environmental Monitoring and Assessment 136: 419–435.
16. Qi Y., Darilek J.L., Huang B., Zhao Y., Sun W., and Gu Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma 149: 325–334.
17. Rashidi M., Seilsepour M., Ranjbar I., Gholami M., and Abbassi S. 2010. Evaluation of some soil quality

indicators in the Varamin region, Iran. World Applied Sciences Journal 9(1): 101–108.
18. Reynolds W.D. and Clarke Topp G. 2007. Soil water desorption and imbibition: tension and pressure techniques. p. 981-997. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
19. Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., and Yang X.M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma 152: 252–263.
20. Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., and Tan C.S. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. Geoderma 146: 466–474.
21. Rezaei A., Gilkes R.J., and Andrews S.S. 2006. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. Geoderma 136: 229–234.
22. Romaniuk R., Giuffré L., and Romero R. 2011. A soil quality index to evaluate the vermicompost amendments effects on soil properties. Journal of Environmental Protection 2: 502–510.
23. Sahebjame A.A. 2002. The precise detailed study of soil and land classification of Torogh (Khorasan-Razavi) agricultural research station. Final report, 1146. Soil and Water Research Institute. (In Persian)
24. Schoenholtz S.H., Van Miegroet H., and Burger J.A. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. Forest Ecology and Management 138: 335-356.
25. Sharma K.L., Mandal U.K., Srinivas K., Vittal K.P.R., Mandal B., Kusuma J.G., and Ramesh V. 2005. Long term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. Soil & Tillage Research 83: 246–259.
26. Skjemstad J.O., and Baldock J.A. 2007. Total and organic carbon. p. 225–237. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (ed.) Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
27. Velasquez E., Lavelle P., and Andrade M. 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. Soil Biology & Biochemistry 39: 3066–3080.
28. Zangiabadi M., Gorji Anari M., Ghalebi S., and Ramezani Moghaddam M.R. 2017. Effects of soil pore size distribution on integral energy of different soil water ranges. Soil Research 31(3): 463–472. (In Persian with English abstract)
29. Zangiabadi M., Gorji Anari M., Shorafa M., Keshavarz P., and Saadat. S. 2017. The relationship between integral energy (EI) of different soil moisture ranges and S-index in medium to coarse-textured soils. Journal of Water and Soil 31(2): 386–398. (In Persian with English abstract)
30. Zangiabadi M., Gorji Anari M., Shorafa M., Khavari Khorasani S., and Saadat. S. 2016. The relationship between integral water capacity (IWC) index and some physical properties in Khorasan-Razavi province. Journal of Water and Soil 30(4): 1192–1201. (In Persian with English abstract)

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 1, March-April 2021, p. 107-119

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۱۱۹-۱۰۷

Determination of Soil Physical Quality Index in Medium to Coarse-textured Soils of Khorasan-Razavi Province

M. Zangiabadi[1*]- M. Gorji[2]- P. Keshavarz[3]

Received: 23-06-2020
Accepted: 27-12-2020

Introduction: Soil quality can be considered as a comprehensive index for sustainable land management assessment. Studying the most important soil physical properties and combining them as an index of soil physical quality (SPQI) could be used as an appropriate criteria for evaluating and monitoring soil physical changes. In this regard, this study was conducted to determine the most important soil physical properties and calculate the SPQI of medium to coarse-textured soils of Khorasan-Razavi province.

Materials and Methods: Torogh Agricultural and Natural Resources Research and Education Station of Khorasan-Razavi province is located in south-east of Mashhad city (59° 37' 33"-59° 39' 10" E, 36° 12' 31"-36° 13' 56" N). Soil texture variability in this research station is one of its outstanding features. The soil textures are classified into loam, silt loam, silty clay loam, clay loam, and sandy loam. More than 90% of agricultural soils in Khorasan-Razavi province are classified in these five texture classes. Using the available data, 30 points with different soil textures and OC contents were selected. The soil samples were collected from 0-30 cm soil depth at each point. Intact soil cores (5 cm diameter by 5.3 cm length) were used for sandbox measurements, and disturbed soil samples were used to determine other properties. Required laboratory analysis and field measurements were conducted using standard methods. In this research, 35 soil physical properties as total data set (TDS) including: soil moisture release curve (SMRC) parameters, particle size distribution and five size classes of sand particles, soil bulk and particle density, dry aggregates mean weight diameter (MWD) and stability index (SI), S-index, soil porosity and air capacity, location and shape parameters of soil pore size distribution (SPSD) curves, relative field capacity (RFC), plant available water measured in matric pressure heads of 100 and 330 hPa for the field capacity (PAW_{100} and PAW_{330}), least limiting water range measured in matric pressure heads of 100 and 330 hPa for the field capacity ($LLWR_{100}$ and $LLWR_{330}$), integral water capacity (IWC) and integral energy (EI) of different soil water ranges were measured and calculated for 30 soil samples. The most important soil physical properties were selected using principal component analysis (PCA) method by JMP (9.02) software. Selected physical properties as minimum data set (MDS) were weighted and scored using PCA results and scoring functions, respectively. In this study, three types of linear scoring functions were used. The soil physical quality index (SPQI) was calculated by two scoring and two weighting methods for each soil sample and the differences between these four SPQIs were tested by sensitivity index.

Results and Discussion: Principal component analysis results showed that among 35 soil physical properties (TDS) which were studied at this research, six properties of mean pore diameter (d_{mean}), PAW_{100}, total porosity (POR_T), EI $LLWR_{330}$, SI and PAW_{330} accounted for about 90% of the variance between soil samples. Weight of the selected properties (MDS) was calculated by the ratio of variation in the data set explained by the PC that contributed the selected property to the total percentage of variation explained by all PCs with eigenvalue > 1. In this research, the parameters of PAW_{100}, total porosity (POR_T), SI and PAW_{330} were scored using scoring function of more is better, EI $LLWR_{330}$ was scored using scoring function of less is better and d_{mean} was scored using scoring function of optimum by two scoring methods with score ranges of 0.1-1 and 0-1. Considering unweighted and weighted MDS and two ranges of scores, four SPQIs were calculated for each soil sample. The results showed that SPQIs which were calculated by the MDS derived from PCA method and scoring weighted MDS at the range of 0-1, had the highest sensitivity index and could represent the differences between the studied soil samples better than other SPQIs. By this method, maximum and minimum SPQI values for the studied soils were 0.82 and 0.12, respectively. SPQI is a relative comparison criterion to quantify the soil physical quality which could be applied only for the studied soils with specific characteristics.

Conclusion: The results of this research showed that minimum data set (MDS) explained about 90% of the

1 and 3- Assistant Professor and Associate Professor of Soil and Water Research Department, Khorasan-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran, Respectively.
(*- Corresponding Author Email: m.zangiabadi@areeo.ac.ir)
2- Professor of Soil Science Engineering Department, University of Tehran, Karaj, Iran
DOI: 10.22067/jsw.2020.15000.0

variance between soil samples. Combining MDS into a numerical value called soil physical quality index (SPQI) could be used as a physical comparison criterion for the studied soils. From the SPQI based on the MDS indicator method, soil quality was evaluated quantitatively. Soil samples with grade I, II, III, and IV accounted for 10%, 36.7%, 30%, and 23.3% of the soil samples, respectively.

Keywords: Minimum data set, Principal component analysis, Soil quality index